

風力発電から見た大阪湾岸における大気乱流の特徴

河野 仁、角倉麻由美

兵庫県立大学 環境人間学部 社会環境部門

Analysis of Atmospheric Turbulence in the Waterfront of Osaka Bay for the Siting of Wind Turbines

Hitoshi KONO and Mayumi SUMIKURA

School of Human Science and Environment
University of Hyogo

Abstract

We analyzed the atmospheric turbulence in the waterfront of Osaka Bay for the siting of wind turbines. The turbulence was observed by Kansai International Airport Co., Ltd for a year at T - station at the height of 100 m and N - station at the height of 30 m using 3-D sonic anemometers. The results are as follows:

- (1) Three components of turbulence intensity observed in the waterfront were small for wind directions blowing from the sea and the three components of average turbulence intensity at T - station was less than 0.1 for these wind directions. At both T and N stations, the variation of turbulence intensity with wind direction is larger than that between day and night.
- (2) The turbulence intensity (σ_v / U , σ_w / U) at T - station varied with atmospheric stability. They increased in unstable conditions and decreased in stable conditions.
- (3) Three components of turbulence intensity scattered widely under light wind. However, for wind speed larger than 10 m s^{-1} , they converged into a constant value and they were $\sigma_u / U = 0.08$, $\sigma_v / U = 0.09$ and $\sigma_w / U = 0.07$ at T - station.

Key words : atmospheric turbulence, field measurement, waterfront, wind power generation

1. はじめに

大気乱流は風力発電効率や風車の耐久性に影響を与える。そこで、風車設置のためには、風速と同時に乱流について調べる必要がある。日本において風車は、海岸線と山頂、島に多く設置されている。この論文では海岸線における乱流に焦点を当て、野外観測データの詳細な解析を行う。

これまで、全国120地点の風観測データから、海岸線や海上は地表面粗度が小さいために、内陸部の平地と比べて乱流強度が小さく、風速が大きいという結果が得られている。(矢半田・河野、2009¹⁾) また、永井(2002)²⁾

は大阪湾上の関西国際空港と対岸の陸上測定局の大気乱流データを解析し、海上は陸上と比べて乱流強度が小さく、風速が大きいことを示した。河野・永田(2003)³⁾ は関西国際空港と海岸線上及び陸上の風速データから、海上、及び海岸線上の風速は陸上に比べて、1.7倍、1.3倍あり、また、潜在発電量ではそれぞれ3.9倍、2.3倍あることを示した。

モニン・オブコフの相似理論に見られるように平坦地における乱流強度は一般に大気安定度と地表面粗度の関数となることはよく知られている(竹内清秀、1997)⁴⁾。しかし、風向によって地表面粗度や大気安定度が急激に

変わる海岸線において、風向、大気安定度と乱流強度の関係を長期間の観測データを基に解析した例はない。風車が海岸線に多く設置されているところから、このような解析をすることは実用上重要と考える。ここでは、関西国際空港株式会社が設置した、大阪湾南部の海岸線における風速の観測データを使って、海岸における大気乱流強度の季節変化、日変化、さらに、風向、風速、大気安定度との関係について解析し、この地域における乱流の特徴について調べた。

2. 解析データ

関西国際空港株式会社の測定局の中で、超音波風速計を設置している2つの測定局、田尻スカイブリッジ（以下T測定局）と南部処理場（以下N測定局）のデータを使用した。2地点の位置については図1に示す。解析に使用したデータの測定期間は1999年の1年間である。T測定局（図2）は海岸線沿いにある100m高さの橋の支柱上に設置されている。超音波風速温度計は支柱上に取り付けられた2m高さのポールの上に設置されている。T測定局の北西側は海、南東側は2階建て住宅地と田畑である。この超音波風速温度計のメーカーはKAIJO、型式は本体DA-600、プローブTR61-Cである。N測定局（図3）は海岸線から170m離れた建物の屋上の5m高さのポール上に設置されており、風速計の高さは地上30mである。なお、N測定局の周囲は空き地であり、海岸線までの間には建物はない。南東側は田畑と2階建て住宅である。N測定局に設置されている超音波風速計のメーカーはKAIJO、型式は本体TR61-C、プローブTR-61Aである。

風速データは超音波風速計によって、サンプリング周波数は20Hzで毎時10分間測定されている。1時間毎の風向 θ (deg.)、風速 U (m s^{-1})とそれらの標準偏差が記録されている。風速の標準偏差は流れ方向 σ_u と鉛直方向 σ_w 、それに、風向の標準偏差 σ_θ が測定されている。平均風向方向である u 成分、水平面で平均風向に直角方向である v 成分、そして、鉛直方向の w 成分について乱流強度 σ_u/U 、 σ_v/U 、 σ_w/U を求めた。ここで、 $\sigma_v/U = \tan \sigma_\theta$ とした。また、T測定局では、2高度（地上 $z_1=20\text{m}$ 、 $z_2=100\text{m}$ ）で気温を観測している。温度計のメーカーはNIPPON ELECTRIC INSTRUMENT COMPANY、型式はN60である。この温度計は白金測温抵抗体を使用したものであり、通風シールドが付いている。測定されている2高度（地上

$z_1=20\text{m}$ 、 $z_2=100\text{m}$ ）の温位 $(\theta_{20}, \theta_{100})$ と z_2 高度の風速 U のデータから(1)式を使ってバルクリチャードソン数 R_{iB} を計算した。

$$R_{iB} = \frac{g}{\theta_{20}} \times \frac{(\theta_{100} - \theta_{20})/dz_1}{(U/z_2)^2} \quad (1)$$

ここで、 $g = 9.8\text{ms}^{-2}$ 、 $dz_1 = z_2 - z_1 = 80\text{m}$ である。

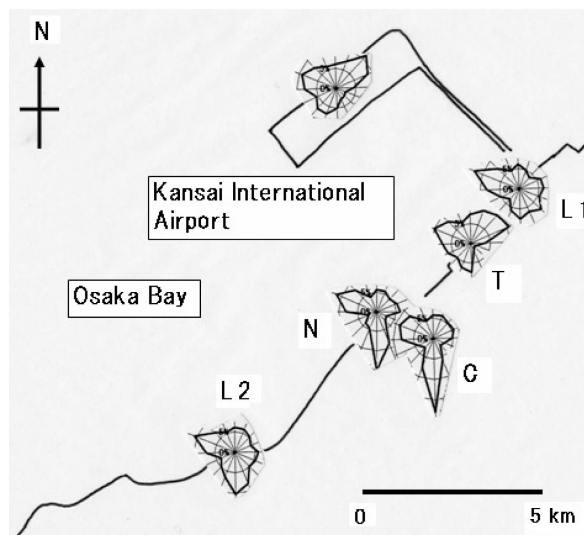


図1 T測定局、N測定局、周辺風測定局の位置及び1年間の風配図（1999年）³⁾



図2 T-測定局 超音波風速計は海側、向かって左の支柱（高さ100m）の先端に設置されている（写真はSWからNEに向かって撮影している）



図3 N測定局(WからEを向いて撮影している)
(超音波風速計は建物の屋上にある3本のポールの左端のポール高さ5mの先端に設置されている)

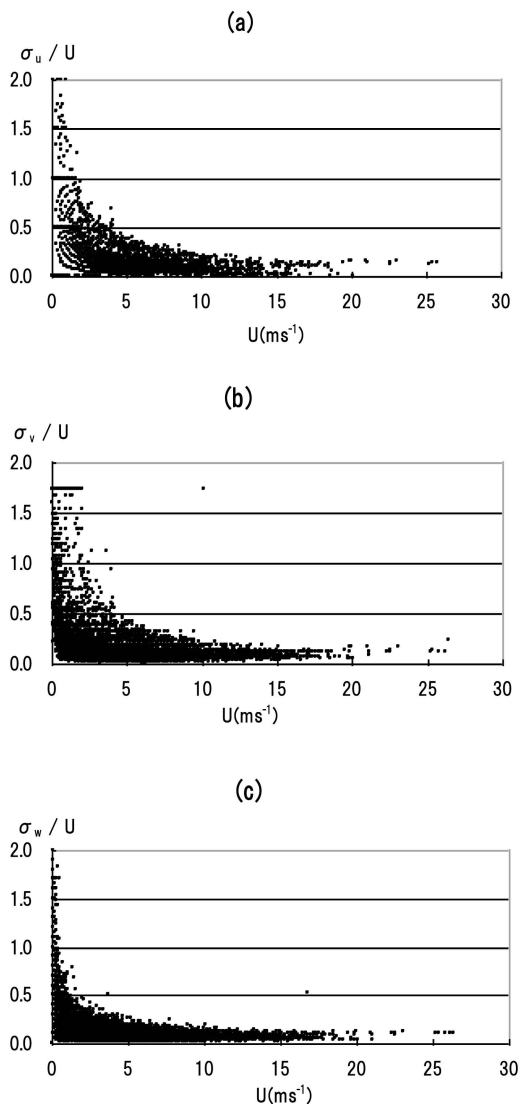


図4 T測定局における風速と乱流強度の3成分
 σ_u / U , σ_v / U , σ_w / U の関係

3. 解析結果と考察

3. 1 風速との関係

図4及び図5にT測定局及びN測定局での風速と乱流強度の関係を示す。T測定局及びN測定局ともに、風速が大きくなるにつれ、乱流強度は3成分とも変動幅が小さくなる傾向を示し、T測定局では、風速 15 m s^{-1} 以上の乱流強度の平均値は、 $\sigma_u / U = 0.08$, $\sigma_v / U = 0.09$, $\sigma_w / U = 0.07$, N測定局では、風速 10 m s^{-1} 以上の乱流強度の平均値は、 $\sigma_u / U = 0.13$, $\sigma_v / U = 0.14$, $\sigma_w / U = 0.07$ となる。

風速が弱いと大気安定度は強安定から強不安定まで変化し、そのために乱流強度の値は小さい値から大きな値まで変化する。逆に風速が強い場合、例えば地上10m風速が 6 m s^{-1} 以上になると、パスキルの大気安定度分類では大気安定度は時間帯や日射量、雲量に関わらず中立

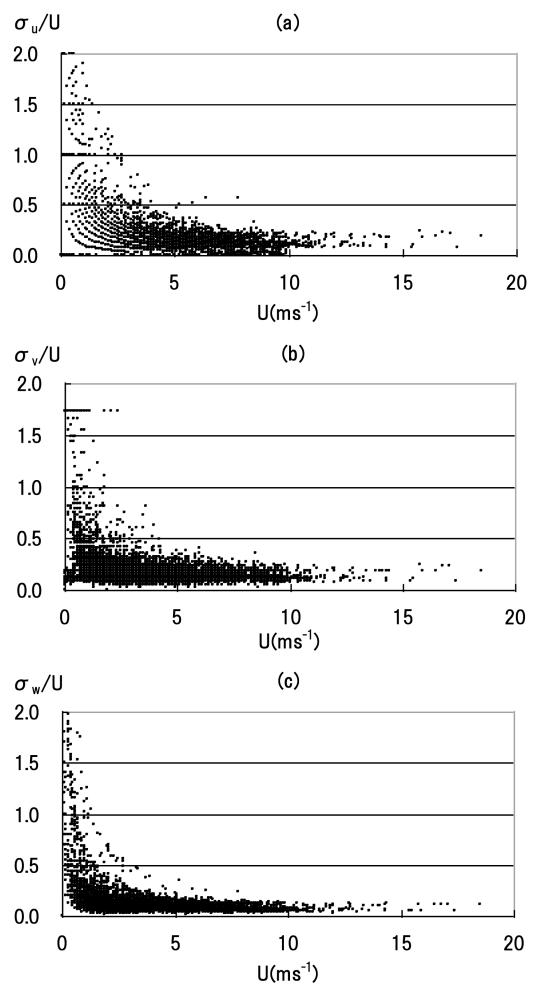


図5 N測定局における風速と乱流強度の3成分
 σ_u / U , σ_v / U , σ_w / U の関係

となり、乱流強度は地表面粗度に対応して一定の値になることが理論的にわかっている。本データも風速が 10 m s^{-1} 以上の場合に乱流強度が一定の値に収束している。風力発電の立場からは、強風速で乱流強度が小さくなるのは発電に有効である。以下の解析では、発電を開始する風速（カットイン風速） 3 m s^{-1} 以上のデータに限定する。

3. 2 大気安定度との関係

T測定局におけるバルクリチャードソン数と乱流強度の v , w 成分との関係を求め、図6に示した。ここに使用したデータは8月、12月の2ヶ月間のデータである。図中の曲線はバルクリチャードソン数（横軸）の区間毎に乱流強度の値（縦軸）の幾何平均を取り、滑らかな曲線で結んだものである。図6からばらつきはあるが、バルクリチャードソン数が小さく不安定になるほど乱流強度が大きく、逆に安定な時は乱流強度が小さくなるのがわかる。なお、N測定局では気温の鉛直分布の観測を行っていないので、バルクリチャードソン数と乱流の関係は調べていない。

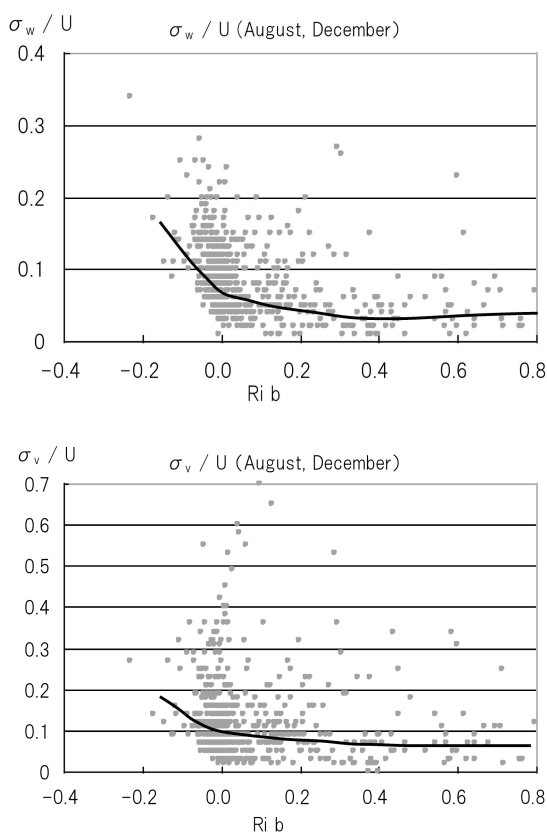


図6 バルクリチャードソン数 Ri_b と乱流強度 (σ_w/U , σ_v/U)、(T測定局、8月、12月、 $U \geq 3 \text{ m s}^{-1}$ のデータ)

3. 3 風向との関係

地表面粗度による乱流強度の変化を調べるために、T測定局及びN測定局における風向と乱流強度の関係を図7及び図8に示した。昼間は7時から18時、夜間は19時から6時とした。図7から乱流強度は風向により変化している。T測定局の乱流強度はSEの風向時に特に大きくなるが、この方向には橋の支柱があり、SEを中心とする3方向の乱流強度はその後流の影響を受けていると考えられるので、このデータは除外する。海方向 (SW~NW~NE) と陸方向 (NE~SE~SW) を比較すると、乱流強度の3成分とも粗度が小さい海方向が0.1以下、粗度が高い陸方向が0.1~0.2と海方向が小さい。海方向からの風が吹く場合の乱流強度の値は永井(2002)²⁾が関西国際空港の建設予定地で10mのポール上で観測した乱流強度 $\sigma_u/U = 0.1$ とほぼ同じ値を示した。昼夜別には昼間より夜間がやや小さいが、昼夜による変化よりは風向による変化のほうが大きい。

N測定局に関しては、地上高度30 mであり、T測定局よりも地上に近いところで観測している。また、3階建の建物の屋上に設置されているところから建物本体のキャビティの影響を強く受けていると考えられる。特に、風速計が建物の屋上のNW側に設置されているために、SE方向の風に対して、建物本体の起こす乱れの影響が大き

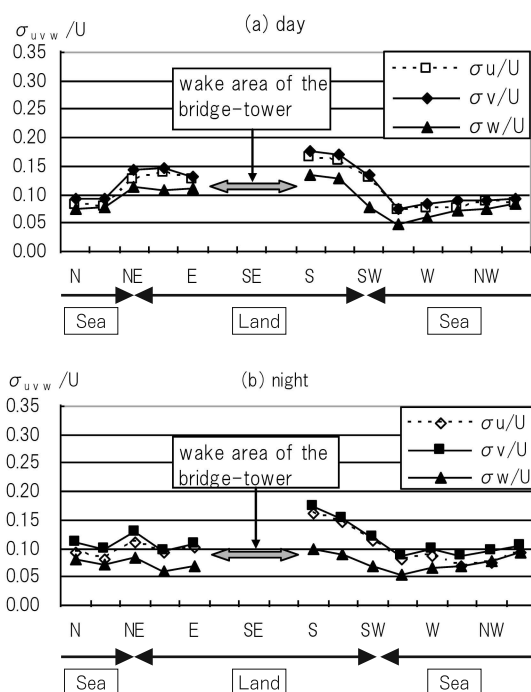


図7 T測定局における風向別乱流強度（年間データ、 $U \geq 3 \text{ m s}^{-1}$, 昼夜別）；グラフの下矢印は海Seaからの風向と陸Landからの風向の範囲を示す

いと考えられる。乱流強度の観測値は全般にT測定局よりも大きい。特に、SE方向の乱流強度が大きい。風向別乱流強度は海方向（WSW～NW～NE）が陸方向（ENE～SE～SW）よりも小さい。

なお、これまでの観測データから一般に平坦地の接地層においては、大気安定度が中立時に地表面粗度によらず、 $\sigma_u : \sigma_v : \sigma_w = 1.91 : 1.54 : 1.00$ の関係があることがわかっている(Panofsky and Dutton, 1984)⁵⁾。これと比較すると、T測定局の乱流強度は $U > 10 \text{ m s}^{-1}$ で、 $\sigma_u : \sigma_v : \sigma_w = 1.1 : 1.3 : 1.0$ であり、3成分間の差が小さい。特に海から吹く場合に差が小さく、等方性の乱流に近い値が観測されている。これは橋脚の支柱の影響を受けている可能性がある。また、N測定局の乱流強度は $U > 10 \text{ m s}^{-1}$ で、 $\sigma_u : \sigma_v : \sigma_w = 1.9 : 2.0 : 1.0$ であり、これまでの観測データと比較すると σ_u 、 σ_w に比べて σ_v の値が少し大きい。その原因としては、建物の起こす乱流が影響している可能性がある。

4. 結論

大阪湾に面する海岸の2地点における乱流強度について、橋脚（地上100m）および建物の屋上（地上30m）における1年間の観測データを解析した。観測値は橋脚

や建物の起こす乱流の影響をいくらか受けてはいるが、この地域の乱流の主な特徴を知ることができた。

- (1) T測定局、N測定局共に海から風が吹く場合に乱流強度は3成分とも小さくなり、T測定局では乱流強度は3成分とも平均0.1以下となる。これは陸上に比べて海上の地表面粗度が小さいことによると考えられる。また、乱流強度に関しては昼夜による変化より風向による変化のほうが大きい。
- (2) 海岸部の高度100m（T測定局）の乱流強度（ σ_v / U , σ_w / U ）は大気が不安定な場合に大きく、安定な場合に小さくなる傾向があり、一般的な大気乱流の性質に一致している。
- (3) 風速が弱くなるに従って、乱流強度は小さい値から大きな値まで変動幅が大きくなる。しかし、発電を開始するカットイン風速に相当する 3 m s^{-1} 以上では、変動幅は小さくなり、T測定局では風速 15 m s^{-1} 以上における平均値は $\sigma_u / U = 0.08$, $\sigma_v / U = 0.09$, $\sigma_w / U = 0.07$ となる。

謝辞

関西国際空港㈱から風のデータ提供を受けた。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 矢半田頌子、河野 仁（2009）日本列島の風速分布及び地形と風速・乱流－野外観測データの解析、風力エネルギー、Vol. 33, No.4, 104-110.
- (2) 永井紀彦（2002）観測データに基づく洋上風の特徴、風力エネルギー、Vol.26, No. 3, 22-31.
- (3) 河野 仁、永田優育（2003）地表面粗度が大きく変化する海岸線付近での風速多点観測データの解析－大阪湾岸における風力エネルギーの推定、風力エネルギー、Vol.27, No. 2, 46-50.
- (4) 竹内清秀（1997）、風の気象学、東京大学出版、9-22.
- (5) Panofsky, H. A. and Dutton, J. A. (1984), Atmospheric turbulence, John Wiley and Sons, 159-160.

（平成21年9月9日受付）

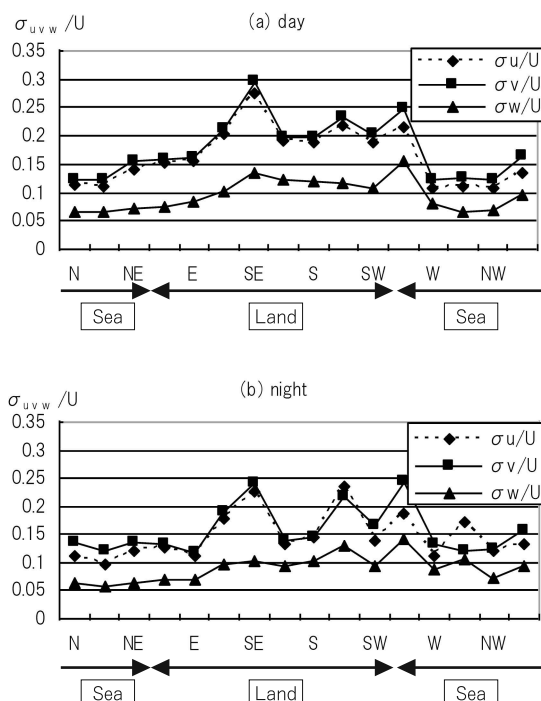


図8 N測定局における風向別乱流強度（年間データ， $U \geq 3 \text{ m s}^{-1}$ ，昼夜別）；グラフの下に矢印は図7と同じ意味である